

海州露天矿内排土场边坡稳定性研究

董心悦¹, 祁云^{1,3}, 傅鹏¹, 彭涛², 薛凯隆¹

(1. 山西大同大学 煤炭工程学院, 山西 大同 037000; 2. 山西保利铁新煤业有限公司, 山西 晋中 030600; 3. 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 随着露天煤矿开采规模逐渐扩大, 固体废弃物堆积而成的内排土场堆高和边坡倾角逐渐变大, 导致边坡失稳滑坡、崩塌等严重事故。为确保内排土场在安全稳定的前提下获得更大的排土容积, 以海州露天矿南侧内排土场人工土石边坡为研究对象, 基于强度折减理论, 采用FLAC^{3D}数值模拟软件对内排土场人工土石边坡进行稳定性分析。结果表明: 海州露天矿内排土场人工土石边坡两剖面稳定性安全系数分别为1.182和1.164, 均小于安全储备系数1.3, 内排土场存在边坡失稳出现滑坡的危险, 需对其进行削坡处理; 当削坡至35 m位置时, 两剖面的稳定性系数均可达到安全储备系数。本文结果可为内排土场方案优化设计提供理论基础。

关键词: 露天矿; 内排土场; 边坡; 稳定性; 安全系数

中图分类号: X936 文献标志码: A DOI:10.3969/j.issn.1003-1251.2024.04.015

Study on the Stability of the Slope in the Inner Dump of Haizhou Open Pit Mine

DONG Xinyue¹, QI Yun^{1,3}, FU Peng¹, PENG Tao², XUE Kailong¹

(1. School of Coal Engineering, Shanxi Datong University, Datong 037000, China;

2. Shanxi Poly Tiexin Coal Industry Co., Ltd., Jinzhong 030600, China;

3. College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: With the gradual expansion of the scale of open-pit coal mining, the pile height and slope inclination of solid waste piles and inner dumps gradually increase, leading to serious accidents such as slope destabilization landslides and avalanches. In order to have a larger soil discharge volume in the inner soil discharge field under the premise of safety and stability, the artificial soil and rock slopes of the inner soil discharge field at the south side of Haizhou open-pit mine are taken as the object of study. Based on the theory of strength reduction, the stability analysis of the artificial soil and rock slopes of the field is carried out by using the numerical simulation software of FLAC^{3D}. The experimental results show that the stability and safety coefficients of the two profiles of the artificial soil and rock slopes in the inner soil discharge site of Haizhou open pit mine are 1.182 and 1.164 respectively, which are less than the safety reserve coefficient of 1.3. There is a danger of landslides due to the instability of the slopes in the internal soil discharge site, and it is necessary to carry out the cutting treatment for the slopes. When the slope is cut to 35 m, the stability coefficients of the two profiles can satisfy the requirement of the safety reserve, which provides a theoretical basis for the design of the optimal inner soil discharge program.

Key words: open pit mine; inner waste dump; slope; stability; safety factor

收稿日期: 2023-11-20

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC0807900); 山西大同大学博士科研启动项目(2020-B-08, 2020-B-18); 山西大同大学研究生教育创新项目(23CX49)

作者简介: 董心悦(1999—), 女, 硕士研究生; 祁云(1988—), 通信作者, 男, 副教授, 研究方向为矿井灾害防治、应急技术与管理等。

近年来,随着露天矿山开采深度的增加,大量被剥离的表土和废岩互相堆积形成矿山内排土场,且排土场高度逐年上升^[1-2]。由于矿山内排土场均为人工土石集中排弃而成,边坡岩土体强度相对较低,遇到雨雪天气极易引发滑坡和崩塌等地质灾害,严重威胁矿山的安全^[3-5]。因此,开展露天矿内排土场边坡稳定性的研究具有重要意义。

目前,国内外学者针对露天矿内排土场边坡稳定性开展了大量的研究。曹博等^[6]、杨福卿等^[7]采用三轴蠕变试验反演出露天矿内排土场蠕变参数,并以此建立三维数值模拟模型探究填方土蠕变沉降特征,得出排土场台阶安全稳定性系数与台阶高度呈对数函数关系。宋仁忠等^[8]结合孔隙结构压缩变形特性对排土场重塑载荷进行理论分析,提出内外排土场水平分层处理法,有效地解决了内排土场的失稳滑移问题。Rahul等^[9]、曹兰柱等^[10]采用人工神经网络计算内排土场边坡安全系数,优化了边坡堆积参数,并基于强度折减理论探究了空间形态对边坡稳定性的影响。石耀国^[11]利用数值模拟软件研究边坡应力及位移变化特征,并结合极限平衡法分析排土场边坡稳定性。Qiu等^[12]利用图像对排土场边坡的粒径分布进行分析,为边坡稳定性分析提供了参考。罗正东等^[13]结合克里金各向异性关联映射与主动学习方法得到具有工程实用性的高效率边坡稳定可靠度分析方法。以上研究大多借鉴堤坝、基坑等大型填方工程沉降变形的研究成果,具有一定的局限性。

鉴于此,本文以海州露天矿内排土场南侧人工土石边坡为研究对象,采用FLAC^{3D}数值模拟软件分析海州露天矿内排土场人工土石边坡的稳定性,以为排土场边坡的安全设计提供指导。

1 工程概况及参数选取

1.1 工程地质条件

海州露天矿位于辽宁省阜新市太平区,由于煤炭资源的开采,海州露天矿已经形成了东西长约3 900 m、南北宽约1 800 m、平均垂深约350 m的废弃矿坑。矿坑南部人工土石边坡顶部标高180~220 m,北部人工土石边坡顶部标高150~170 m,南部坑内边坡角度约为46°,北部边坡角约为20°。海州露天矿位置及边坡现状如图1所示。



图1 海州露天矿位置及边坡现状

Fig. 1 Location and slope status of Haizhou open pit mine

海州露天矿地处辽宁省西部低山丘陵区,属于北温带半干旱季风气候,冬季干冷,年平均降水量565.6 mm,其地层中共含有8个弱层分布,各弱层大多数为碳质页岩或泥质页岩,性质极其不稳定。岩石因力学性质受气候影响易被破坏,使边坡强度降低,导致边坡失稳。

1.2 模型的建立及参数的选择

根据现场工程地质测绘和排土场设计相关资料,海州露天矿内排土场人工土石边坡主要是由采矿剥离的矿山表层土体、强风化凝灰岩和硅质岩构成的岩土混合物,其结构松散、压缩性较强、力学性质差。为获得更准确的排土场稳定性参数,本文采用分层法对内排土场人工土石物料进行处理^[14-16],不同分层岩土体力学参数如表1所示。

表1 不同分层岩土体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock and soil mass in different layers

层位	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	内聚力 C/kPa	体积模量 K/GPa	剪切模量 G/GPa
排弃物料	1.85	23	20	5.13	0.89
弱层	1.85	23	0	5.13	0.89
黄土	1.87	24	25	0.95	5.30
砂岩	1.93	26.4	26.3	8.40	1.80
基岩	2.60	39.64	300	8.40	1.80

考虑到人工土石边坡发生变形时应力与应变关系,采用Mohr-Coulomb准则,以强度折减理论计算边坡稳定性系数^[17-18],分析海州露天矿内排土场人工土石边坡的稳定性问题。为了尽可能反映边坡真实稳定性,选取海州露天矿内排土场软弱夹层较多的1-1、2-2勘探线,按1:1比例构建FLAC^{3D}数值模拟模型。模型尺寸分别为:1 600 m×1 000 m×410 m(1-1勘探线),确立网格模型共495 126个单元;1 600 m×1 000 m×456 m(2-2

勘探线),确立网格模型共 500 215 个单元。网格划分均满足精度要求。在模型底部设置 x 、 y 、 z 方向的约束,模型的底部边界水平和铅直方向的位移均为 0,顶部边界和边坡坡面为自由边界面。剖面 1 和剖面 2 的数值模拟模型如图 2 所示,模型从上到下依次为黄土、砂岩和基底 3 个分层。

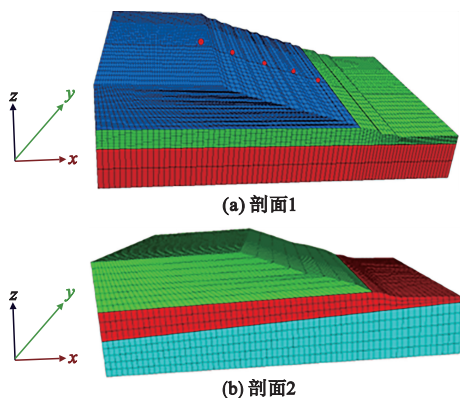


图 2 数值模拟几何模型

Fig. 2 Geometric model of numerical simulation

2 内排土场边坡稳定性结果分析

2.1 工程地质条件

为了分析内排土场边坡区域稳定性情况,沿内排土场边坡中轴线各标高的表面从上到下依次布置 5 个监测点(见图 2(a)红色圆点),对边坡表面进行为期 120 天的位移数据监测。以剖面 1 为例,边坡位移监测曲线如图 3 所示。

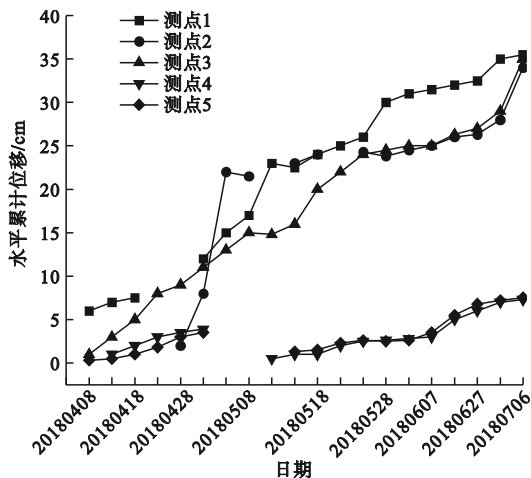


图 3 边坡位移监测曲线

Fig. 3 Slope displacement monitoring curves

由图 3 可知,各测点监测到的边坡表面位移量随监测时间的延长而增加,且位移量变化均呈现滑移前期缓慢增加、滑移中期急速增加、滑移后

期缓慢增加并趋于稳定的趋势。其中,测点 1、2、3 在监测结束时位移量分别为 0.34、0.33 和 0.32 m,且位移量仍有增大的趋势,测点 4 和 5 在监测结束时,位移量分别为 0.048 和 0.46 m,且位移量基本趋于稳定,此外,对比各测点监测数据可以看出测点 4 和测点 5 监测数据远小于其他各测点的监测数据,说明内排土场边坡在该区域内出现失稳的风险相对较小。综合测点 1 至测点 5 范围内内排土场边坡位移变化量及地层结构特点分析,可判定该内排土场边坡具有向采坑侧坐落式滑移的危险,且容易在边坡的腰部位置产生断裂现象。

2.2 内排土场边坡稳定性模拟结果

自然状态下内排土场人工土石边坡剖面 1 和剖面 2 位移云图如图 4 所示。由图 4 可知,受重力作用影响,内排土场边坡临空侧位移量变化较大,即边坡沿着底板弱层方向具有向采坑侧滑移的趋势,且首先出现滑移倾向的区域在坡角附近。

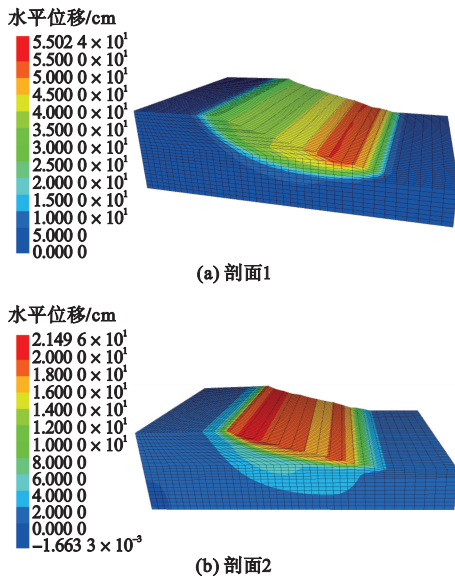


图 4 边坡位移云图

Fig. 4 Cloud chart of slope displacement

剖面 1 和剖面 2 的塑性区云图如图 5 所示。图中:none 表示无;shear-n 表示当前循环中出现剪切破坏单位;shear-p 表示以前循环出现的剪切破坏单元。由图 5 可以看出,内排土场人工土石边坡塑性区主要集中在土石底板弱层处,受重力影响后,边坡沿着软弱泥岩层组易发生向采坑侧坐落式滑移的现象,这与在海州露天矿实测分析结果相吻合。

2.3 内排土场边坡稳定性分析

海州露天矿内排土场人工土石的排弃方向与岩层倾向一致,为典型的顺层排弃,整体坡角为

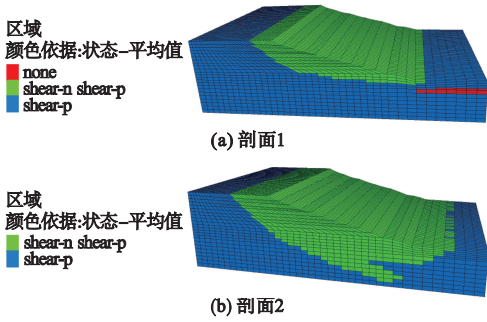


图 5 边坡塑性区云图

Fig. 5 Cloud chart of slope plastic zone

20°, 根据现场监测数据可知排土场边坡人工土石稳定性较差, 随着内排年限的推移, 受重力、雨水冲刷等作用影响后容易出现失稳现象, 边坡失稳滑移趋势云图如图 6 所示。通过计算可知剖面 1 和剖面 2 安全系数分别为 1.182 和 1.164, 均低于安全储备系数 1.3 的要求, 很容易出现边坡失稳, 急需采取措施消除失稳危险。

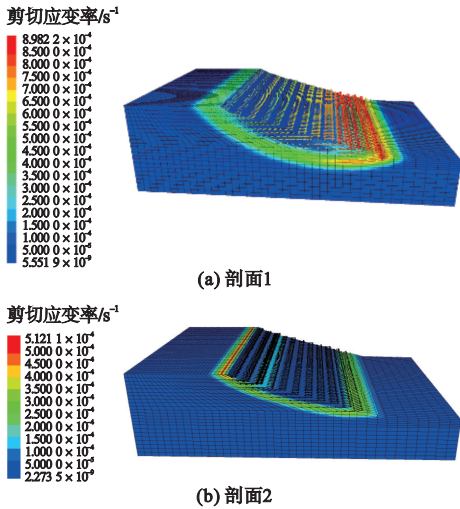


图 6 边坡失稳滑动趋势云图

Fig. 6 Cloud chart of slope instability sliding trend

3 内排土场边坡优化

海州露天矿内排土场人工土石边坡稳定性系数基本上不满足安全储备系数要求, 为了确保边坡不失稳, 需要对其进行参数优化^[19-21]。现场采用分层削坡(清理)的方式治理边坡失稳问题, 削坡处理后内排土场人工土石边坡稳定性变化情况如图 7 所示。由图 7 可知: 剖面 1、剖面 2 削坡后各分层边坡稳定性均呈上升趋势, 当削坡至 35 m 位置时, 剖面 1、剖面 2 的稳定性系数均可达到 1.32, 该位置即为实施削坡工作对应的临界点。

通过对海州露天矿内排土场人工土石边坡采取削坡处理, 达到降低边坡单台阶坡面角和减载的作用, 有效降低下滑段的剩余下滑力, 从而抑制坡体下滑, 逐渐减小对水平路面运输设备及人员的影响。通过放缓边坡消除剪出口的不平衡推力, 使该滑坡的抗滑力与下滑力的比值增大, 即该边坡的安全稳定系数大于安全储备系数, 从而使其在设计工况下处于稳定状态。

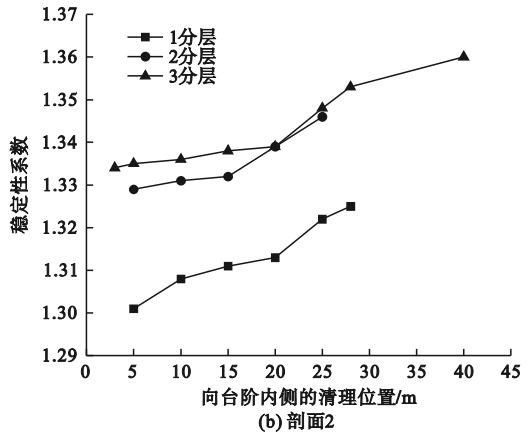
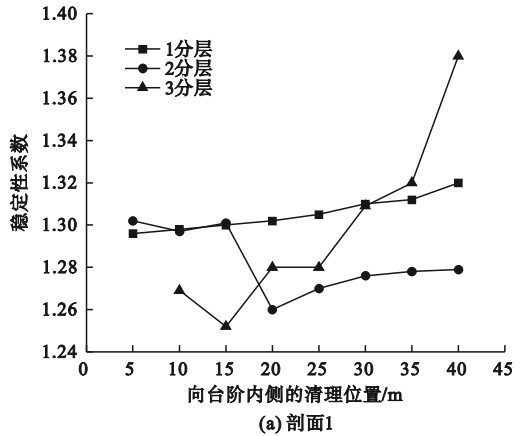


图 7 削坡后边坡稳定性变化情况

Fig. 7 Changes of slope stability after cutting

4 结论

本文以海州露天矿南侧内排土场人工土石边坡为研究对象, 采用 FLAC^{3D} 数值模拟软件对内排土场人工土石边坡进行稳定性分析, 结论如下。

- 1) 边坡位移量随监测时间的延长逐渐增加, 内排土场边坡具有向采坑侧坐落式滑移的危险。
- 2) 数值模拟结果表明, 内排土场边坡沿着底板弱层方向具有向采坑侧滑移的趋势, 且首先出现滑移倾向的区域在坡角附近。剖面 1 和剖面 2 剖面安全系数分别为 1.182 和 1.164, 均低于安全系数 1.3 的要求。

3) 削坡处理后剖面 1、剖面 2 各分层边坡稳定性均呈上升趋势,当削坡至 35 m 位置时,剖面 1、剖面 2 的稳定性系数均可达到 1.32,该位置即为实施削坡工作对应的临界点。

本文对削坡后边坡稳定性分析结果可为排土场边坡的安全设计提供参考。

参考文献 (References):

[1] 李钢. 高寒地区露天矿排土场稳定性分析研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(10): 72-78.
LI G. Study on stability analysis of waste dump of open-pit mine in alpine area[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(10): 72-78. (in Chinese)

[2] JIA L, FANG L H, GAO S S, et al. An investigation of a floor treatment plan for In-pit dumps with an underlying weak layer[J]. Sustainability, 2023, 15(9): 7329.

[3] WANG Z L, LIU B, HAN Y H. Combined influence of rainfall and groundwater on the stability of an inner dump slope[J]. Natural Hazards, 2023, 118(3): 1961-1988.

[4] 贺超, 崔松军, 王亮, 等. 基于 PFC^{2D} 的排土场边坡稳定性研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(4): 15-18.
HE C, CUI S J, WANG L, et al. Slope stability of waste dump based on PFC^{2D} [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021, 41(4): 15-18. (in Chinese)

[5] 夏嘉南, 李根生, 卞正富, 等. 露天矿内排土场近自然地貌重塑研究: 以新疆黑山露天矿为例[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(11): 213-221.
XIA J N, LI G S, BIAN Z F, et al. Research on the reshaping of the near-natural landform of the internal dump for open-pit mine: a case study of Heishan Open-pit Mine, Xinjiang, China [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(11): 213-221. (in Chinese)

[6] 曹博, 黄云龙, 张院生, 等. 承载河道下高大内排土场沉降蠕变三维反演分析[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(3): 1306-1314.
CAO B, HUANG Y L, ZHANG Y S, et al. Three dimensional back analysis on creep settlement of large inner dump with a river channel [J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(3): 1306-1314. (in Chinese)

[7] 杨福卿, 田涯, 张传伟, 等. 露天煤矿内排土场台阶高度优化与稳定性研究[J]. 煤矿安全, 2021, 52(7): 245-251.
YANG F Q, TIAN Y, ZHANG C W, et al. Study on step height optimization and slope stability of dump in opencast coal mine [J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(7): 245-251. (in Chinese)

[8] 宋仁忠, 韩兴, 杨日, 等. 基于岩土重塑特性的排土场分层和稳定性评价方法[J]. 煤矿安全, 2020, 51(12): 283-287.
SONG R Z, HAN X, YANG R, et al. Layered and stability evaluation method of waste dump based on remolding characteristics of rock and soil [J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(12): 283-287. (in Chinese)

[9] RAHUL, KHANDELWAL M, RAI R, et al. Evaluation of dump slope stability of a coal mine using artificial neural network [J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2015, 1(3): 69-77.

[10] 曹兰柱, 王珍, 王东, 等. 露天煤矿端帮逆倾软岩边坡稳定性研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(3): 1-6.

CAO L Z, WANG Z, WANG D, et al. Study on stability of reversed inclined soft rock slope at end slope of surface mine [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(3): 1-6. (in Chinese)

[11] 石耀国. 魏家崱露天矿边坡稳定性分析与研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2019.

[12] QIU P Y, PABST T. Characterization of particle size segregation and heterogeneity along the slopes of a waste rock pile using image analysis [J]. Environmental Earth Sciences, 2023, 82(23): 573.

[13] 罗正东, 董辉, 陈铖, 等. 基于克里金模型的边坡稳定可靠度分析方法[J]. 岩土力学, 2015, 36(S1): 439-444.
LUO Z D, DONG H, CHEN C, et al. An analytic method for slope stability reliability based on Kriging model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1): 439-444. (in Chinese)

[14] 曹兰柱, 张剑锋, 王东. 软弱倾斜复合基底排土场边坡失稳机理与控制[J]. 金属矿山, 2019(5): 43-47.
CAO L Z, ZHANG J F, WANG D. Instability mechanism and control of the dump slope with soft inclined composite basement [J]. Metal Mine, 2019(5): 43-47. (in Chinese)

[15] 许旭堂, 简文彬. 兰桥排土场边坡失稳模式及其稳定性数值分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(6): 686-690.
XU X T, JIAN W B. Numerical analysis of instability mode and stability for lanqiao dump slope [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(6): 686-690. (in Chinese)

[16] SENGUPTA S, ROY I. Study of internal dump stability of dudhichua open cast project, northern coalfields limited, India [J]. Journal of the Institution of Engineers (India); Series D, 2015, 96(1): 67-75.

[17] 李帅, 苏永华, 杜俊旺. 基于突变特征的边坡工程失稳判据研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(6): 852-859.
LI S, SU Y H, DU J W. Research on instability criterion of slope project based on mutation characteristics [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(6): 852-859. (in Chinese)

[18] 丁鑫品, 李凤明, 刘博文, 等. 顺倾基底高段排土场边坡失稳模式与控制对策[J]. 煤矿安全, 2020, 51(7): 244-247.
DING X P, LI F M, LIU B W, et al. Instability mode and control measures of high slope in waste dump with bedding basement [J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(7): 244-247. (in Chinese)

[19] 王家臣, 李阳春, 徐文彬, 等. 软-陡基底排土场边坡破坏模式与机理[J]. 矿业科学学报, 2021, 6(2): 139-147.
WANG J C, LI Y C, XU W B, et al. Failure mode and mechanism of mine waste dump with a soft and steep layer base [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2021, 6(2): 139-147. (in Chinese)

[20] 王余鹏. 露天弃碴场边坡失稳破坏与防治策略研究: 以白鹤山隧道弃碴场为例[J]. 长沙大学学报, 2021, 35(2): 44-49.
WANG Y P. Study on slope instability failure and prevention strategy of open-pit spoil ground: a case study of Baiheshan tunnel spoil ground [J]. Journal of Changsha University, 2021, 35(2): 44-49. (in Chinese)

[21] PAN X H, SUN H Y, WU Z J, et al. Study of the failure mechanism and progressive failure process of intact rock patches of rock slope with weak surfaces [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(4): 951-966.

(责任编辑: 徐淑姣)